

Гоглачев А.В., Лойко А.Э., Гоглачев А.А.

## **ВИРТУАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ**

Goglachev A.V, Loiko A.E., Goglachev A.A.

## **VIRTUAL EXPERIMENTS AT STUDYING THERMAL PHYSICS DISCIPLINES**

*algo\_mail@inbox.ru*

*ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»*

*г. Екатеринбург*



**НОТБ-2014**

*Рассмотрено применение виртуальных экспериментов при изучении дисциплин теплофизического профиля. Приведены виртуальные эксперименты по изучению теплопроводности многослойной плоской стенки и явления сфероидального состояния жидкости. Проанализирована физическая сущность изучаемых явлений.*

*Application of virtual experiments at studying thermal physics disciplines is examined. Virtual experiments for studying thermal conductivity of multi-layer flat wall and spheroid condition of liquid phenomenon are given. Physical essence of subject phenomena is analyzed.*

При изучении дисциплин теплофизического профиля, таких как «Теплофизика», «Термодинамика» и др., необходимо уделять значительное внимание физической сущности изучаемых процессов, влиянию изменения различных параметров системы на рассматриваемое явление.

Наилучшее понимание изучаемого явления будет достигнуто, если оно может быть реализовано и рассмотрено в виде физического эксперимента. Однако, большинство теплофизических явлений не может быть реализовано в силу различных причин даже в лабораторном практикуме (например, при сверхвысоких или сверхнизких температурах, в условиях быстропротекающих процессов и т.д.), не говоря уже о лекционных и практических занятиях.

Одним из возможных решений этой проблемы является применение в учебном процессе виртуальных экспериментов, моделирующих на компьютере тот или иной процесс, а также динамические иллюстрации и виртуальные лабораторные работы.

Динамическая иллюстрация и виртуальный эксперимент позволяют более наглядно визуализировать какой-либо процесс, изучить и понять особенности и тонкости его протекания, при необходимости замедлить время протекания процесса, разбить его на составляющие фазы.

На кафедре технической физики УрФУ разработаны динамические иллюстрации и виртуальные эксперименты для изучения критического и

сфероидального состояния вещества, физики кипения жидкостей, теплопроводности твердых тел.

На рис. 1 представлен виртуальный эксперимент по изучению теплопроводности многослойной плоской стенки в зависимости от материала и толщины каждого слоя.

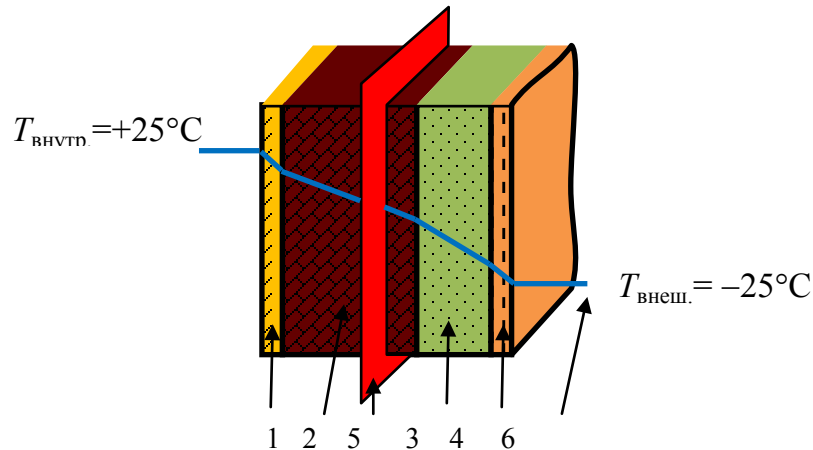


Рис. 1. График распределения температуры в плоской многослойной стенке:

- 1 – внутренняя облицовка; 2 – кирпичная или железобетонная стена; 3 – наружный утеплитель; 4 – наружная облицовка; 5 – плоскость «нулевых температур»; 6 – распределение температуры

Внутреннее термическое сопротивление каждого слоя  $R_{\text{внутр.}}$  определяется толщиной поверхности раздела  $\delta$  и теплопроводностью материала  $\lambda$ :

$$R_{\text{внутр.}} = \frac{\delta}{\lambda}.$$

Для многослойной стенки термическое сопротивление является суммой термических сопротивлений слоев:

$$R_{\text{стенки}} = \sum_i R_{i \text{ внутр.}}.$$

Плотность теплового потока  $q$  определяется по формуле:

$$q = \frac{T_{\text{внутр.}} - T_{\text{внеш.}}}{\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i}}.$$

В данном эксперименте для определения тепловых потерь в стенке можно изменять внутреннюю ( $T_{\text{внутр.}}$ ) и наружную ( $T_{\text{наруж.}}$ ) температуры,

количество и толщину слоев ( $\delta$ ), материал каждого слоя и, соответственно, коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ). А также менять слои местами. Т. к. внутреннее термическое сопротивление является суммой термических сопротивлений слоев, то тепловой поток через стенку при перестановке слоев не изменится, но изменится график распределения температуры в стенке и местоположение плоскости «нулевых температур». В результате данного виртуального эксперимента студенты могут сделать выводы не только об тепловой эффективности многослойной стенки, но и об экономической целесообразности применения тех или иных материалов (например, можно увеличить толщину какого-либо слоя в 5 раз, при этом общие теплопотери стенки сократятся всего на 5 %).

Рассмотрим виртуальный эксперимент, позволяющий исследовать и визуализировать сфероидальное состояние жидкости.

В 1756 году Лейденфростом обнаружено интересное явление. При попадании капли жидкости на нагретую поверхность, имеющую температуру выше температуры насыщения жидкости, капля формируется в сфероид, который отделяется от поверхности нагрева пленкой пара. Это явление было названо сфероидальным состоянием жидкости (эффект Лейденфроста).

На рис. 2 приведен график изменения времени полного испарения  $\tau$  капли жидкости одного и того же объема от температуры поверхности  $T_w$ .

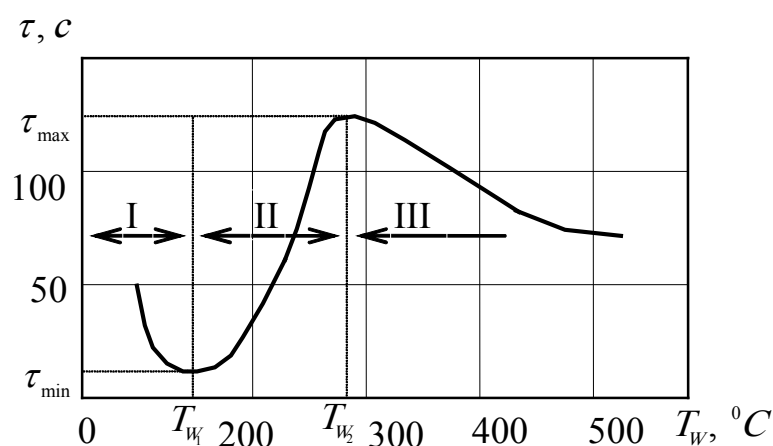


Рис. 2. Зависимость времени полного испарения капли воды при атмосферном давлении от температуры ( $V = 0,0465 \text{ см}^3$ )

Можно выделить 3 области.

Область I соответствует пузырьковому кипению. С ростом  $T_w$  время испарения уменьшается. Перенос тепла осуществляется пузырьками и

испарением жидкости с поверхности капли. Пузырьковое кипение жидкостей соответствует самым большим скоростям испарения жидкости. В этом режиме жидкость не находится в сфероидальном состоянии, а растекается по поверхности нагрева, смачивает ее ( $109\text{ }^{\circ}\text{C} < T_w < 141\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Для воды  $T_{w1} = 141\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Область II соответствует смешанному кипению (пузырьковое и пленочное) и началу сфероидального состояния. С ростом  $T_w$  время испарения резко увеличивается от  $\tau_{min}$  до  $\tau_{max}$ . Происходит отделение капли от поверхности нагрева пленкой пара, которая еще неустойчива, и капля периодически контактирует с поверхностью, т. е. область характеризуется смешанным кипением капли. Время испарения растет за счет уменьшения коэффициента теплоотдачи при передаче тепла через пленку пара. Для воды  $T_{w2} = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$  – так называемая температура Лейденфроста  $T_L$ .

Область III соответствует пленочному кипению. С ростом  $T_w$  выше  $T_L$  время испарения медленно уменьшается (в основном за счет излучения). Происходит полное отделение капли от поверхности нагрева. Это и есть область сфероидального состояния жидкости. Подвод тепла к капле осуществляется за счет теплопроводности через пленку пара и за счет излучения.

Физика кипения отдельной капли жидкости на поверхности нагрева аналогична физике кипения жидкости в большом объеме. Характер зависимостей в случае кипения отдельной капли и в условиях большого объема одинаков.

Скорость испарения капли пропорциональна величине критической плотности теплового потока. При переходе к сфероидальному состоянию жидкости мы имеем дело с кризисом теплоотдачи при кипении.

Демонстрация натурального эксперимента сфероидального состояния жидкости сопряжена с определенными техническими трудностями, т. к. рассмотреть процесс во всех подробностях может позволить только использование высокоскоростной камеры. Кроме того, особую трудность для экспериментального исследования могут представлять бинарные жидкости, смеси и жидкие металлы.

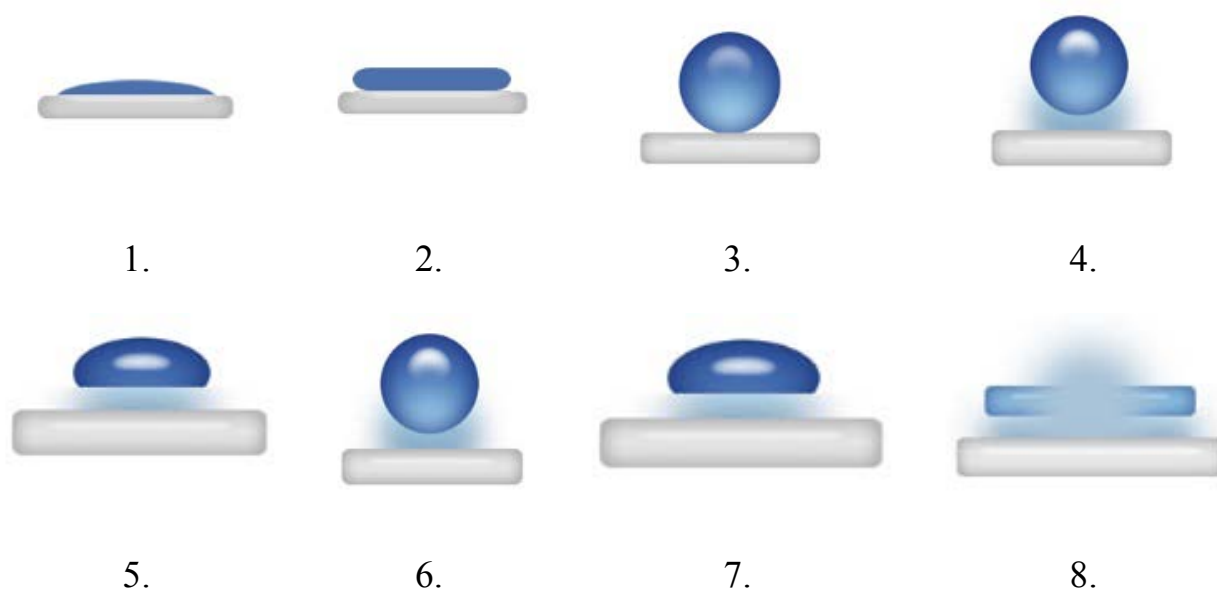


Рис. 3. Стоп-кадры виртуального эксперимента «Сфероидальное состояние жидкости»

На рис. 3 показана последовательность состояний капли воды при увеличении температуры поверхности нагрева  $T_W$ :

1. Температура  $T_W$  меньше температуры насыщения, капля растекается по поверхности нагрева. При  $109\text{ }^{\circ}\text{C}$  начинается кипение в капле жидкости.

2. По мере роста температуры  $T_W$  капля образует плоский сфероид, скорость испарения жидкости становится очень большой и достигает максимума при  $126\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

3. При достижении температуры поверхности нагрева  $T_W = 141\text{ }^{\circ}\text{C}$  вода уже не растекается на поверхности нагрева, капля образует сфероид.

4. Происходит отделение капли от поверхности нагрева пленкой пара (область II на рис. 2). Окончательно температура жидкости в капле всегда на несколько градусов ниже температуры кипения этой жидкости (для воды это обычно  $95 - 97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

5. Пленка пара неустойчива, под действием силы тяжести капля опускается на поверхность нагрева, сплющиваясь (образуя плоский сфероид с колеблющимися краями). Область характеризуется смешанным кипением капли.

6. При контакте капли с поверхностью нагрева часть жидкости переходит в пар, капля снова подпрыгивает. Происходит полное отделение капли от поверхности нагрева. Это и есть область сфероидального состояния жидкости (область III на рис. 2).

7. Процесс подпрыгивания капли на поверхности нагрева продолжается до тех пор, пока достаточна паропроизводительность (пленка пара может удерживать каплю).

8. Объем оставшейся жидкости в капле уменьшился. Пар взрывообразно прорывает каплю жидкости, образуя капли значительно меньшего объема, которые впоследствии испаряются.

Виртуальный эксперимент может подробно визуализировать все этапы перехода жидкости к сфероидальному состоянию.

Нужно отметить, что в той же последовательности (рис. 3) эти явления происходят со всеми жидкостями независимо от характера нагретой поверхности, будет ли она поверхностью твердого тела или поверхностью жидкости, на которой данная жидкость может плавать (например, капли серного эфира на поверхности воды, нагретой выше 50 °С, горение натрия на поверхности воды).

Виртуальные эксперименты, виртуальные лабораторные работы, динамические иллюстрации, как один из компонентов ЭОР, могут быть использованы преподавателями, как лекционные демонстрации, так и для проведения лабораторных работ, и студентами для самостоятельного изучения курса, подготовки к зачётам и экзаменам по этой дисциплине, помощи в курсовом и дипломном проектировании, студентами очной, заочной, дистанционной, электронной форм обучения, магистрами технических направлений подготовки.